

陆相薄互层稠油油藏热采时移地震监测互均衡处理效果分析

云美厚¹, 丁伟¹, 王开燕², 杨晓燕¹, 朱伟强¹

(1. 胜利石油管理局 地球物理勘探开发公司, 山东 东营 257100; 2. 大庆石油学院, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 陆相储层稠油热采时移地震监测数据开展的互均衡处理结果表明, 此项处理有利于有效时移地震异常的识别与热前缘位置的准确确定。当原始采集资料的一致性极差时, 互均衡处理虽然可以改善资料的一致性, 因此, 提高野外采集震源子波和采集资料的一致性, 是陆相薄互层油藏时移地震监测顺利实施的关键。振幅属性是陆相薄储层油藏时移地震监测的主要标志之一, 笔者在振幅处理方面做了一些探索, 取得一定效果。

关键词: 时移地震; 互均衡处理; 陆相薄互层; 稠油热采; 一致性; 振幅属性

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2006)05-0435-06

时移地震技术主要是利用重复地震测量来监测油藏随时间的动态变化。它是油气田进入开发阶段提高采收率的重要技术, 也是油气藏开发动态监测的重要手段。目前, 该技术在世界范围内得到迅速发展, 并日趋成熟。据统计, 全球已累计进行了100多个时移地震项目, 每年投入的总费用大约为5 000万1亿美元, 取得的经济效益极为显著^[1]。目前, 针对陆相薄互层油藏实施时移地震监测尚没有明显的突破, 加强时移地震方法、理论以及互均衡处理技术的研究和应用, 对于我国时移地震监测技术的发展和具有积极意义。

针对陆相储层稠油热采时移地震监测数据开展的互均衡处理结果表明, 互均衡处理有利于有效时移地震异常的识别与热前缘位置的准确确定。但当原始采集资料的一致性极差时, 互均衡处理虽然可以改善资料的一致性, 但并不能从根本上解决问题。因此, 提高野外采集震源子波和采集资料的一致性, 是陆相薄互层油藏时移地震监测顺利实施的关键。由于储层厚度较小, 振幅属性是陆相薄储层油藏时移地震监测的主要标志之一。

时移地震技术顺利实施的关键之一是时移地震资料的一致性或可重复性。然而, 由于野外采集、处理等多方面因素的影响, 要保证不同时间采集的地震数据的完全一致是很困难的, 也是不可能的^[2-4]。通常, 影响时移地震数据一致性的非储层因素主要有2类, 即采集因素和处理因素。采集因素又包括

采集环境和采集方法。前者, 主要表现为施工现场的人为和气候因素造成的环境噪声, 以及采集时间和季节变化等近地表因素对低降速带速度和厚度变化的影响。后者的影响主要表现为不同的记录设备和采集参数造成的不一致。处理因素包括处理参数和处理流程。主要有动校正、静校正、切除参数、振幅均衡、反褶积、成像速度、多道去噪等。

从地震信号的角度来看, 上述各种因素引起时移地震信号的差异主要体现在: ①信号的时间延迟, 即纵向时移; ②信号的能量或振幅变化; ③信号的频率、带宽差异; ④信号的波形相位差异^[3, 5-6]。

互均衡处理技术是用来消除时移地震资料中与油藏属性变化无关的不一致因素影响的各種处理方法的统称。作为提高时移地震资料一致性的最有效的处理技术, 在时移地震资料处理中得到应用, 并取得了效果。作为一类面向实际资料的处理技术, 互均衡处理并不是唯一的, 目前尚未形成一套成熟和固定的处理流程, 互均衡处理的研究和应用的探讨还将继续下去^[4, 5, 7-8]。

由于陆相薄互层油藏大多为埋深较大的固结砂岩油藏, 其厚度薄、泥质含量高、岩石孔隙度中等(一般在15%~25%之间), 岩石渗透率以及孔隙流体饱和度变化和原油的原始油气比均比较低。使得实施时移地震监测油藏条件先天不足, 因而, 国内在时移地震的投入较少。虽然在胜利、辽河、新疆等地曾进行了稠油热采地震监测先导试验, 但成效并不

显著^①。目前,中海油所承担的国家 863 项目,在渤海油田实施水驱稠油地震监测试验,前期的采集结果也并不乐观。笔者通过对胜利油田稠油热采时移地震监测数据的实际处理,取得了一定的效果,也发现了一些问题,在此抛砖引玉,意在引起更多研究者的注意,并共同探讨。

1 热采前后储层岩石及地震响应特征变化

根据油藏工程理论^[9],在油藏注蒸汽之前,储层岩石主要为稠油和地层水饱和的原状地层,储层温度和压力较低。当由于一次采油使得储层压力低于泡点压力时,储层内将会有游离气析出,造成储层波速降低,在地震剖面上可能会引起振幅“亮点”异常(Domenico 效应),对于厚储层,甚至会出现明显的地震波旅行时间延迟,即同相轴下拉现象^[10]。当储层厚度较小时,除非波速降低巨大,否则一般不会显示出明显的时间延迟。在高压注蒸汽开采过程中,储层压力将缓慢升高,游离气也会重新溶解到原油中,造成储层波速增大、振幅减弱、反射波旅行时间缩短、“亮点”异常消失。随着蒸汽的不断注入,在注汽井周围将会形成一个高温饱含蒸汽带并不断向外扩展,造成注入井周围波速明显下降,进而引起时间延迟效应的明显增大。与此同时,由于横向地层不断传热,饱和蒸汽带的前缘将出现蒸汽凝析区,该区主要为高温热水和蒸汽的混合相带,由于含水饱和度增高,因而储层波速可能会增大。在蒸汽区的下游出现热流体区或原油富集区。因为原油的黏度随温度变化是可逆的,在蒸汽驱动作用下的受热原油将由高温区进入低温区,原油黏度回升,导致原油在受热区的下游大量聚集形成原油富集区,表现为较高的含油饱和度和相对较低的地层速度^[11-12]。由此可见,在蒸汽驱动开采过程中,在注汽井周围由内向外油层流体和温度的横向分布大致可划分为蒸汽饱和区、凝析区、原油富集区和未波及区 4 个区带,其中,蒸汽饱和区温度、压力最高,然后,由内向外各区带温度、压力渐次降低,直到未波及区的原始储层温度压力状态。一般来说,各区的界面是倾斜的,正常蒸汽驱动的注采过程中,某一区带也可能不存在,但各区带的基本顺序不会改变。

由此可见,在注蒸汽开采中,储层内不仅表现为温度、压力的明显变化,而且流体饱和度和流体相态的变化也非常明显。这些将会引起地震波旅行时间、振幅、频率、相位等属性的变化。但是,对于陆相薄层或薄互层,尽管稠油热采过程中存在较大的温度和岩石弹性特性变化,然而,由于储层厚度较小,

地震剖面往往很难表现出厚储层情形下常见的延迟效应,通常主要为储层反射振幅的变化。因此,振幅属性应当是陆相储层时移地震监测的主要标志之一。在实际时移地震资料分析中究竟采用何种属性还应当具体问题具体分析。

2 互均衡处理方法原理

互均衡处理技术主要包括面元重置、互均衡处理和一致性评价环节。其中,面元重置仅仅在野外采集数据网格不同时采用,通常对于继承性时移地震数据应用较多,主要目的是获得具有相同反射面元网格分布的数据。

一致性评价是对互均衡处理后的数据用一定的标准进行分析、评价,目前并无统一的评价标准。最常用的方法是时间域求取 2 个数据体的振幅差。一般来说,经互均衡处理后,在时间域内 2 个数据体的差异将变小。此外,基于频谱分析的频谱和能谱一致性标准以及总能量差异最小标准和相关性标准等有时也被采用。

互均衡处理的基本思想是设计校正算子,以便归一化基础测线和监测测线,算子设计的准则是将油藏上方 2 次或多次地震记录以基础测线地震记录为依据,将监测测线的振幅、时间、相位、频率等校正到与基础测线一致,然后,将求出的校正算子用于监测测线。具体处理内容包括振幅校正、时间校正、相位校正、频率校正和匹配滤波几个部分^[6-8]①。

振幅校正也称振幅均衡,主要目的是使不同时间测量的地震数据处于同一能量水平。通常将基础数据与监测数据均方根振幅极大值的比值作为校正算子,用于监测数据体上,就实现了振幅校正。不过,该方法受噪声的影响较大。

时间校正也称时差校正和时延校正,目的是设法消除时移地震资料的纵向时间差异,实现重复测量数据的时间一致性。这种时间差异可能来源于野外采集过程,也可能是由于资料处理中的某些环节,如由动、静校正等产生的。最常用的时差校正方法是通过求取基础数据和监测数据的互相关极值来确定时间差异,并实施校正。

频率校正一般可通过带通滤波实现频带宽度的统一,还可以通过功率谱比较进行频率补偿与校正。

相位校正最常用的作法是通过匹配滤波来实现,效果比较理想。

① 云美厚. 胜利油田时间推移地震油藏监测技术研究[R]. 中科院地质地球物理研究所,胜利油田博士后工作站,2005.

匹配滤波也称为整形滤波,可以使得不同时期采集的地震数据体中与油气藏物性变化无关的部分达到最佳的拟合。本质上,它相当于带宽、振幅和相位的均衡,可以对时差、相位和频谱差异进行校正。

匹配滤波通常是将新资料(监测测量数据)向老资料(基础测量数据)靠拢。它可以有很多种不同算法,一种常用方法就是最小平方意义上的维纳滤波器。该算法求取匹配滤波因子 A ,满足目标泛函 r 在最小平方意义下最小,有

$$r = Ad_1 - d_2, \tag{1}$$

其中 A 为匹配滤波因子, d_1 、 d_2 为向量或矩阵,分别代表油藏上方时窗内基础和监测地震数据。若匹配是在 2 组数据间逐道进行,则称为局部匹配;若针对整个测线或数据体进行,则称为全局匹配或整体匹配。通常,求取匹配滤波因子 A 最终可归结为求解线性方程组

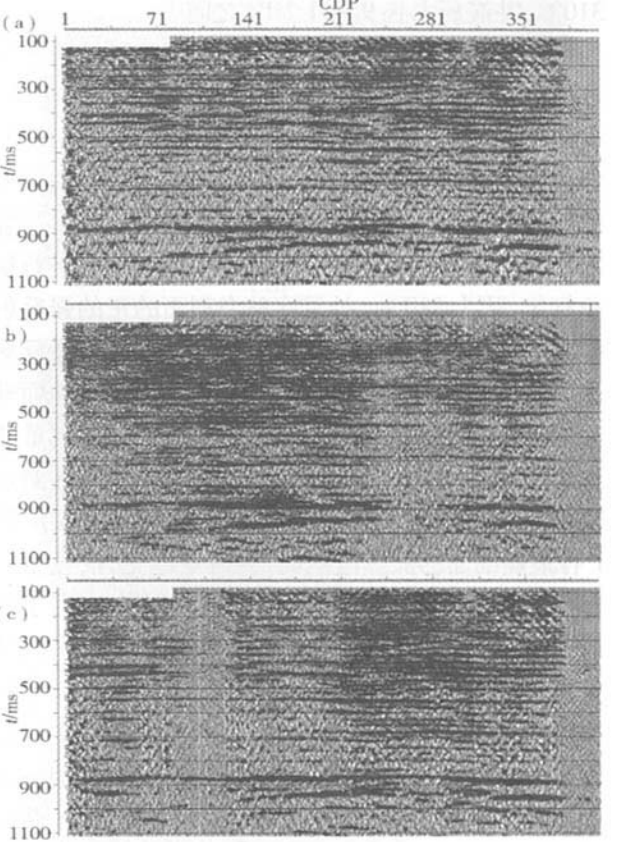
$$CA = e, \tag{2}$$

其中 C 为由 d_2 的自相关函数组成的 Toeplitz 矩阵, e 为 d_1 、 d_2 的互相关函数构成的向量。求出匹配滤波因子 A 后与临测测线进行褶积运算就实现了整个匹配过程。

3 应用实例

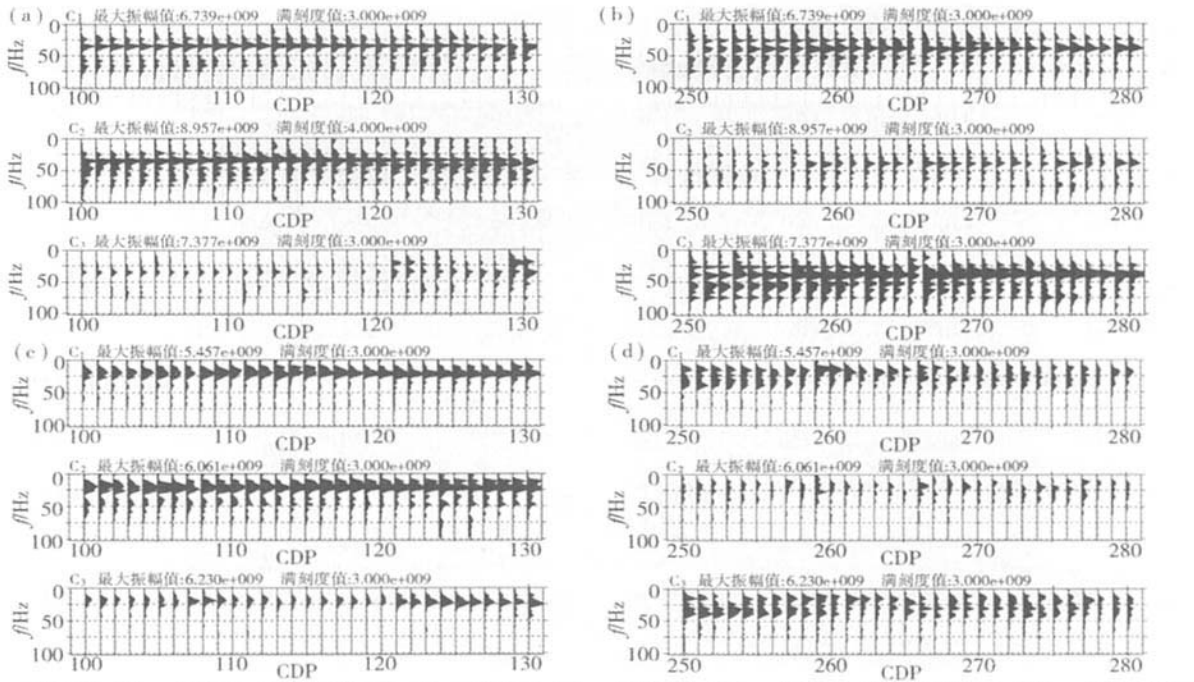
为了验证互均衡处理效果,笔者针对胜利油田某区块稠油热采时移地震监测数据进行了处理方法研究和分析。该区油藏受构造及岩性双重控制,油藏埋藏相对较浅,油层平均埋深为 880950

m。岩石胶结疏松,砾石含量高,成岩性差,平均孔隙度为 31.2%,稠油砾砂岩层分布稳定,厚度较小,有效厚度一般为 1525 m,原始平均剩余油饱和度为 62.2%,油藏压力系数为 1,平均温度为 55℃,饱和压差仅为 2.5 MPa,油藏无底水,边水不活跃,含



a—测量的基础剖面 C_1 b—2 次监测剖面 C_2 c—3 次监测剖面 C_3

图 1 过注汽井测线注汽前后 3 次测量地震剖面



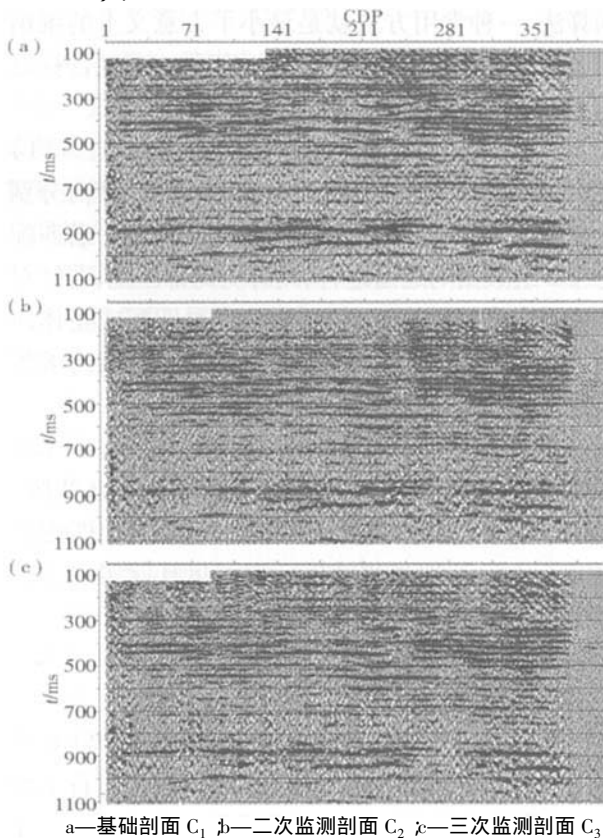
时窗 300 ~ 500 ms, CDP100 ~ 150; b—时窗 300 ~ 500 ms, CDP250 ~ 280; c—时窗 800 ~ 1000 ms, CDP100 ~ 150; d—时窗 800 ~ 1000 ms, CDP250 ~ 280
万方数据 图 2 互均衡处理前不同道、不同时间窗、3 次测量振幅谱比较

油性好,其上覆地层有 50 m 厚的玄武岩层,下伏地层为 S4 段或基底潜山。本区采用反 9 点井网排列汽驱开采,井网尺寸为 200283 m。注汽井每天注入约 120 t 的蒸汽量,周围 8 口采油井产出 120 t 左右的液体,油水大致各占一半,井底温度达到 310℃,井底压力在 911 MPa 之间。

本区注蒸汽开采前后在历时 1 a 的时间内采用相同的观测系统和设备共进行了 3 次地震测量,图 1 显示了过注汽井的基础和监测地震剖面。其中,目的层反射位于 800900 ms 之间。由于目的层厚度较小,因此,地震剖面上反射波主要表现为多层复合反射。通过利用测井资料制作合成记录并进行层位标定,认为 880 ms 处贯穿整个剖面的正的强反射同相轴为目的层底部基底不整合面反射,该强反射上部的负反射波为目的层顶部反射。由于受地面开采井场条件的限制,监测测量中出现了一定数量的空炮和空道,这使得 2 次监测剖面与原始基础测量剖面相比,横向能量分布极不均匀。图 2 为对应图 1 各地震剖面的振幅谱剖面,为清楚起见,仅显示了部分道的振幅谱。从图 1 和图 2 不难看出,由于原始采集、处理和噪声等多方面原因的影响,3 次测量资料不论是在时间域的反射特征,还是频率域的频率特性均存在明显的不一致。特别是在第一次监测剖面的右侧以及第二次监测剖面的左侧与基础测量剖面的差异尤为明显,因此,进行互均衡处理,设法提高 3 次地震采集资料的一致性显得尤为重要。

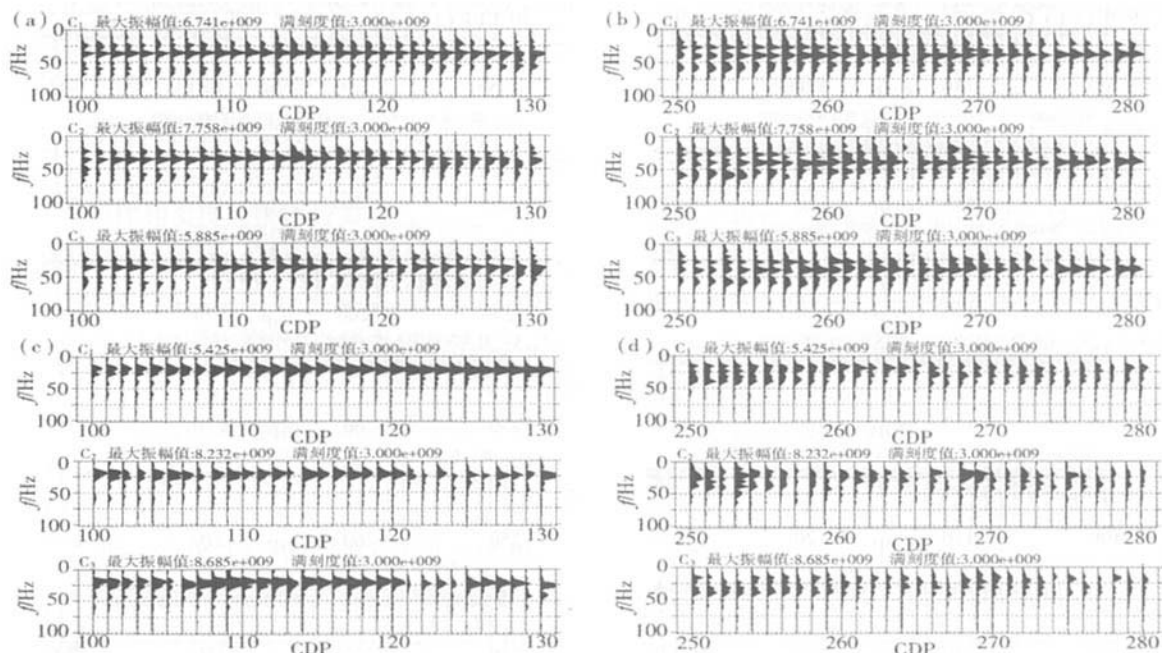
图 3 和图 4 分别展示了互均衡处理后的地震剖

面和相应的振幅谱。通过与图 1 和图 2 的对比分析不难看出,经互均衡处理后剖面反射特征以及频谱的一致性得到了明显的改善。图 5 显示了互均衡处理前后的差值剖面。在互均衡处理之前,差值剖面中非储层部分表现出非常明显的剩余能量(图 5a 和图 5b),这再次清楚地表明 2 次监测测量与基础测



a—基础剖面 C₁ b—二次监测剖面 C₂ c—三次监测剖面 C₃

图 3 图 1 剖面互均衡处理后的结果



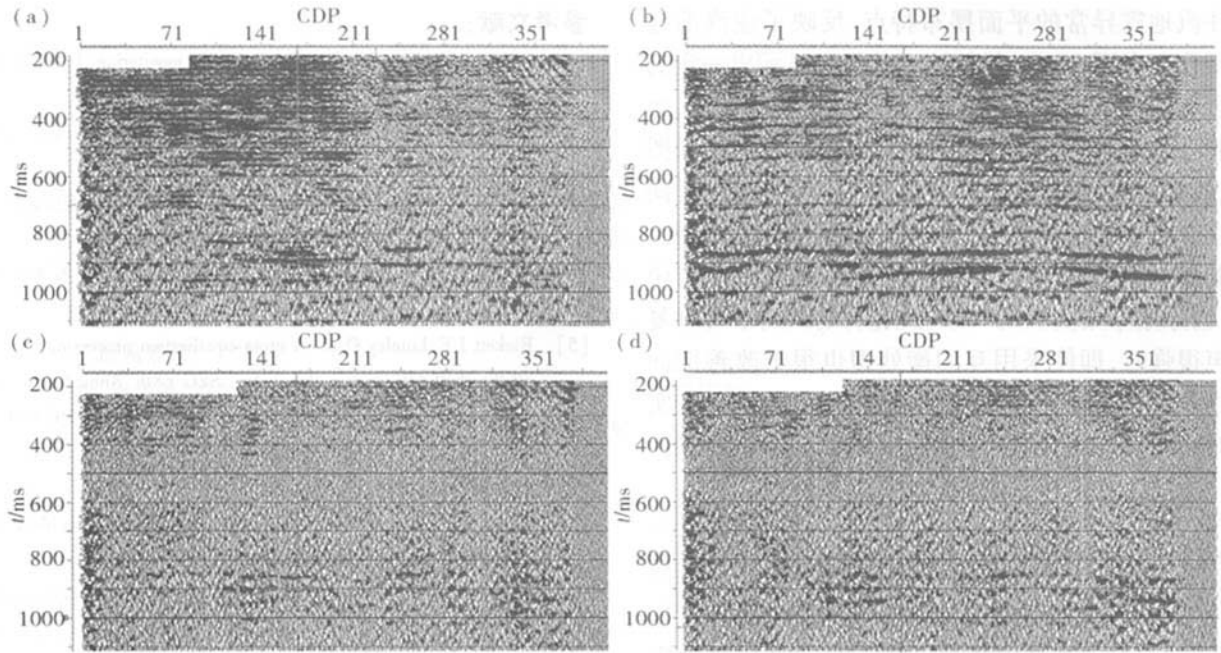
a—CDP100130 300500ms b—CDP250280 300500ms c—CDP100130 8001000ms d—CDP250280 8001000ms

万方数据

图 4 互均衡处理后不同道不同时间窗三次测量振幅谱

量的一致性较差,特别是第二次监测的一致性更差。然而,经互均衡处理后,这种剩余能量被大大地削弱了,位于储层段的虚假异常也得到了较好的消除,非储层部分地震剖面的一致性明显提高了,表明互均

衡处理是非常有效的。分析发现,经互均衡处理后差值剖面图 5c 中,注汽地震异常边界更加清楚。在图中注汽地震异常两侧尽管也存在强的剩余能量,但通过分析可见,其



a—处理前的监测 1—基础差剖面 b—处理前的监测 2—基础差剖面 c—处理后的监测 1—基础差剖面 d—处理后的监测 2—基础差剖面
图 5 互均衡处理前、后的差剖面比较

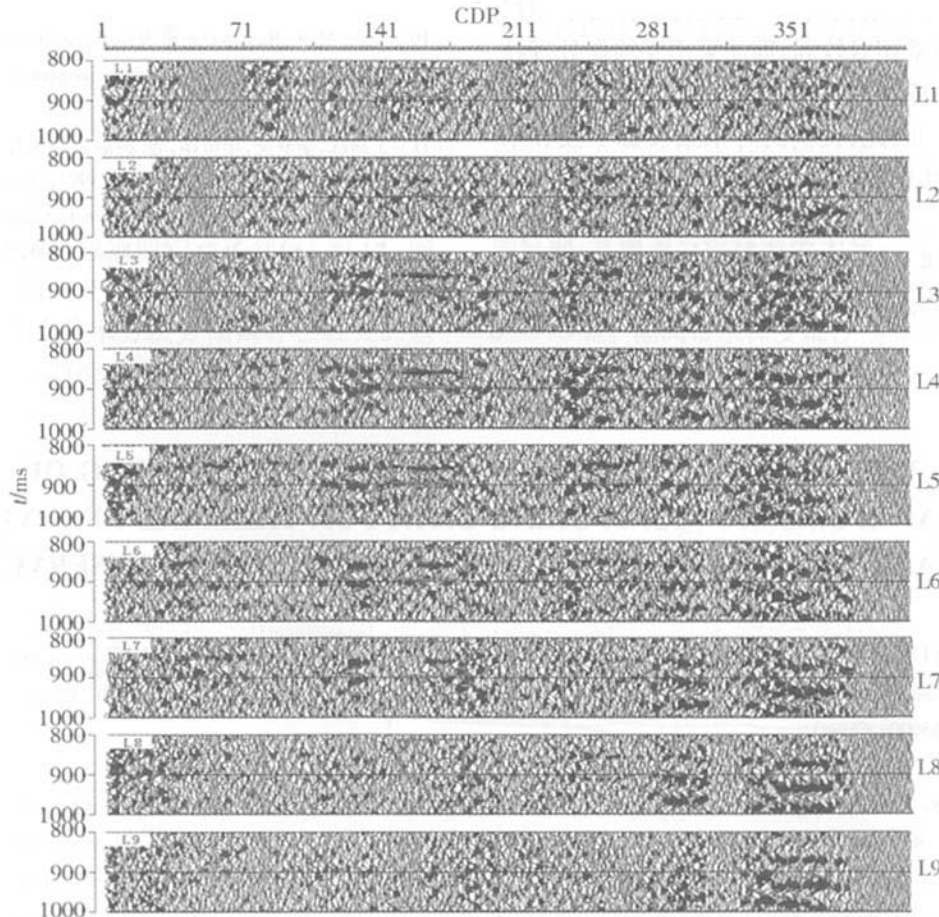


图 6 互均衡处理后各测线第一、二次测量差剖面

在剖面的浅、中、深层都存在,因此推断其可能是由于采集或处理造成的虚假异常。图6为第一次监测前后全部9条线的地震差值剖面(测线间距10 m, CDP间距5 m,剖面长度2 000 m),该图清楚地显示了注汽地震异常的平面展布特点,反映了注汽前缘的变化。在图5d中,尽管注入井附近显示出一定的剩余能量,但由于该次监测资料的整体质量较差,而且剩余能量恰好处于监测资料最差的部分(见图1)相应反射波形的横向一致性和连续性较差,同时所有9条测线中剩余能量的稳定性极差,因此,推断其可能并非真实的注汽地震异常显示。这说明,当原始采集资料的一致性很差,剖面的不可重复噪声很强时,即使采用互均衡处理也很难改善剖面的一致性,获得理想的注汽地震异常。由此可见,实施时移地震,原始采集资料的一致性是非常重要的。

4 结束语

对于陆相薄互层稠油油藏注汽开采地震监测而言,原始采集资料必须具有相对较好的一致性,这样,借助于互均衡处理技术,可进一步改善时移地震资料的可重复性,从而能够揭示注采前缘的动态变化。但如果原始采集资料的一致性较差,由于储层厚度薄,地震异常相对较弱,即使采用互均衡处理技术,也很难获得理想的监测效果,有时甚至得不到有效的地震异常。因此,提高野外采集震源子波和采集资料的一致性,是陆相薄互层油藏时移地震监测顺利实施的关键。

由于陆相薄互层油藏实施时移地震监测的困难性,目前,这方面的研究尚未有明显的突破,因此,加

强时移地震方法、理论以及互均衡处理技术的研究和应用,对于我国时移地震监测技术的应用具有积极的意义。

参考文献:

- [1] Lumley D E. Time-lapse seismic reservoir monitoring[J]. *Geophysics*, 2001, 66(1): 50.
- [2] 云美厚. 油藏注水强化开采地震监测技术的研究与应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2001.
- [3] 云美厚, 张国才, 付雷, 等. 重复性噪声对实施4D地震监测的影响[J]. *勘探地球物理进展*, 2003, 26(1): 13.
- [4] 陈小宏. 四维地震数据归一化方法及实例处理[J]. *石油学报*, 1999, 20(6): 22.
- [5] Rickett J E, Lumley D E. A cross-equalization processing flow for off-the-shelf 4D seismic data[A]. SEG 68th Annual Meeting, Technical Program Expand Abstracts[C]. Tulsa SEG, 1998: 16.
- [6] 李蓉, 胡天跃. 时移地震资料处理中的互均衡技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(4): 424.
- [7] Ross C P, Cunningham G B. Inside the cross-equalization black box[J]. *The leading Edge*, 1996, 15(11): 1233.
- [8] Rickett J E, Lumley D E. Cross-equalization data processing for time-lapse seismic reservoir monitoring: A case study from the Gulf of Mexico[J]. *Geophysics*, 2001, 66(4): 1015.
- [9] 刘慧卿, 范玉平, 赵东伟, 等. 热力采油技术原理与方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- [10] Waite M W, Rusdinadar S. Seismic monitoring of the Duri Steam-flood: Application to reservoir management[J]. *The leading edge*, 1997, 16(9): 1275.
- [11] 王新红, 李梦庚, 李增印, 等. 稠油岩心纵波速度变化规律的实验研究[J]. *石油地球物理勘探*, 1994, 29(5): 642.
- [12] Wang Z, Nur A. Wave velocities in hydrocarbon-saturated rocks: Experimental results[J]. *Geophysics*, 1990, 55(6): 723.

THE EFFECT OF CROSS-EQUALIZATION PROCESSING OF TIME-LAPSE SEISMIC MONITORING DATA FOR THERMAL RECOVERY OF HEAVY OIL IN CONTINENTAL THIN-INTERBEDDING RESERVOIR

YUN Mei-hou¹, DING Wei¹, WANG Kai-yan², YANG Xiao-yan¹, ZHU Wei-qiang¹

(1. Geophysical Exploration and Development Corporation, Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying 257100, China; 2. Daqing Petroleum Institute, Daqing 163000, China)

Abstract: Till now, time-lapse seismic monitoring of continental thin-interbedding reservoir has not made a remarkable breakthrough, and hence the strengthening of the study and application of the time-lapse seismic method as well as the cross-equalization processing technique is of great significance. As a most effective method for improving the repeatability of time-lapse seismic data, the cross-equalization processing technique has been widely used with excellent results achieved. Through the cross-equalization processing of

5 结束语

滩浅海地区由于特殊的地表条件和复杂多变的表层结构,既不同于陆上勘探也不同于海上勘探,尤其在两栖地带存在海陆 2 种施工方式。我们在滩浅海地区地震波激发、接收、观测系统设计、测量及施工技术、差异校正、压制多次波等方面进行大量研究,形成了一套适应胜利滩浅海并可推广到环渤海湾地区的滩浅海地震勘探技术。通过应用这些技术,可使滩浅海地区地震资料的品质有了较大的改进和提高,具备滩海、潮间带、极浅海、浅海环境下全

方位地震勘探的能力,可以较好地完成滩浅海地区地震勘探任务。

参考文献:

[1] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京:石油工业出版社, 1994.
[2] 吴三灵. 实用振动试验技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 1993.
[3] 杨惊涛,朱伟强,秦豹. 海上二次定位技术的研究与应用[J]. 石油物探, 2002, 41(增刊): 67.

THE APPLICATION OF SEISMIC EXPLORATION TECHNIQUE TO THE BEACH AND SHALLOW SEA AREA OF THE SHENGLI OILFIELD

CUI Ru-guo^{1, 2}, WANG Yan-chun¹, CAO Guo-bing^{1, 2}, Pi Jin-yun¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Shengli Petroleum Administration, Dongying 257100, China)

Abstract : Due to the specific surface conditions as well as the complex and varied surface structure of the beach and shallow sea area , the exploration work in such an area is different from both continental exploration and sea exploration. In the amphibian zone , in particular , there exist two working means (sea and continental means). Based on a systematic study of such field collection links in the field as the excitation seismic source , the detector and the observational system , the authors put forward the method for solving the difficult problem of collecting high-quality seismic data. On the basis of a thorough investigation into the interference wave suppression and the difference correction , a complete set of high-precision and practical special techniques for oil and gas exploration in the beach and shallow sea area was developed , and the results show that its geological effect is satisfactory.

Key words : beach and shallow sea ; surface structure ; seismic observational system ; re-locating ; difference correction ; interference wave suppression

作者简介:崔汝国(1969 -)男,高级工程师,1991年毕业于成都地质学院石油地质专业,2003年获得浙江大学硕士学位。一直从事地震勘探技术研究工作,参加了国家“863”项目“滩浅海地区高精度地震勘探技术”的研究工作,现为中国地质大学(北京)在读博士生,公开发表学术论文数篇。

上接 440 页

time-lapse seismic monitoring data obtained in the development of continental heavy oil thin-interbedding reservoir with the use of thermal recovery , it is shown that the cross-equalization processing is helpful to recognizing time-lapse seismic anomaly and determining the position of thermal front. Nevertheless , when the repeatability of original seismic data is very bad , such a processing can only improve the repeatability of time-lapse seismic data , but with no good seismic anomaly detected. The key to the successful performance of time-lapse seismic monitoring for the continental thin-interbedding reservoir is the enhancement of the repeatability of seismic wavelets and seismic data. The amplitude attribute seems to be one of the major criteria for the thinner reservoir.

Key words : time-lapse seismism ; cross-equalization processing ; continental thin-interbedding reservoir ; heavy oil thermal recovery ; consistency ; amplitude attribute

作者简介:云美厚(1965 -)男,教授,1988年毕业于大庆石油学院勘探系物探专业,1993年于北京石油勘探开发科学研究院获硕士学位,2001年毕业于中国地质大学获博士学位,2002年进入胜利油田博士后工作站工作,主要从事时移地震、高分辨率勘探、岩石物理以及地震基础理论研究,出版著作 2 部,发表论文近 50 篇,现为《石油地球物理勘探》杂志编委。